

DE 41 14 407 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Luftwellenlänge einer Lichtquelle mit einem Stabilisierungs-Regelkreis, der eine Mehrdeutigkeit mit bestimmten Sprüngen aufweist. Ferner betrifft sie eine Anordnung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 2.

Interferometrische Längenmessungen in Luft sind sehr genau, wenn die Laserwellenlänge in Luft genau bekannt ist.

Dazu ist die Laserwellenlänge in Luft zu stabilisieren, was durch Frequenzänderung (bzw. Änderung der Vakuumwellenlänge) des Lasers möglich ist.

Luftgefüllte Fabry-Perot-Interferometer sind geeignete Mittel dazu. Es gibt dabei jedoch sehr viele Transmissionsmaxima, d. h. eine Mehrdeutigkeit der Stabilisierung. Es ist daher erforderlich, das Transmissionsmaximum, auf das stabilisiert wird, zu kennen.

Die Änderungen von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit unter gewöhnlichen Umgebungsbedingungen bedingen Brechzahländerungen der Luft und damit nötige Frequenzverschiebungen zur Einhaltung einer festen Luftwellenlänge, die größer sind als der Durchstimmbereich typischer Laserdioden und Festkörperlaser, z. B. Nd-YAG-Laser.

Dem kann begegnet werden durch Springen zu verschiedenen Transmissionsmaxima des Fabry-Perot-Interferometers je nach Umgebungsbedingungen. Das gerade benutzte Transmissionsmaximum und damit die Wellenlänge muß jedoch bekannt sein.

Während eines Meßlaufs kann dies durch Zählen der Sprünge geschehen. Beim Einschalten ist dies jedoch ein Problem.

Bekannte Lösungen — M. Kerner, *Feinwerktechnik + Meßtechnik* 87 (1979), 8 (Fig. 10), EP-OS 00 94 709, DE-OS 39 11 472 verwenden zur Überwindung der Mehrdeutigkeit ein zweites Fabry-Perot-Interferometer anderer Finesse. Auch WO 90/11 492 sieht dazu ein gesondertes Wellenlängenmeßsystem vor.

Aus der nicht vorveröffentlichten Patentanmeldung DE P 40 39 371.2 des gleichen Anmelders sind Probleme und Lösungen der Stabilisierung der Vakuumwellenlänge mit evakuierten Fabry-Perot-Interferometern bekannt.

Es ist die Aufgabe der Erfindung, gattungsgemäße Verfahren und Anordnungen zu vereinfachen und Kalibrier- und Betriebsverfahren dazu anzugeben.

Die Verfahrenslösung gelingt mit den Merkmalen des Anspruchs 1, wonach zur Beseitigung der Mehrdeutigkeit ein Grobwert der Luftwellenlänge aus thermodynamischen Parametern (T_L , p , r_F) der Umgebungsluft und bedarfsweise von Teilen des Regelkreises bestimmt wird, aus diesem Grobwert durch Rundung eine Zahl (N) von Sprüngen (FSR) bestimmt wird und mit dieser Zahl (N) von Sprüngen (FSR) die exakte Luftwellenlänge (λ_L) festgelegt wird.

Eine geeignete Anordnung wird mit dem Kennzeichen des Anspruchs 2 erhalten. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche 3 bis 7.

Ein zugehöriges Kalibrierverfahren ist Gegenstand des Anspruchs 8, wonach zusätzlich Geber und Speicher für die Körpertemperatur des Fabry-Perot-Interferometers und/oder für die Temperatur des Lasers und/oder für die Luftfeuchtigkeit im Volumen des Interferometers vorgesehen sind und im Rechner zur Berechnung des Näherungswerts der Luftwellenlänge herangezogen werden.

Verfahren zum Einschalten zum Normalbetrieb sind Gegenstand der Ansprüche 9 bis 12. Verfahren zum Betrieb sind Gegenstand der Ansprüche 13 bis 14.

Näher erläutert wird die Erfindung mit Hilfe der Zeichnung.

Fig. 1 zeigt in schematischer Übersicht eine Fabry-Perot-stabilisierte Laserlichtquelle an einem Interferometer.

Die Hauptelemente der Anordnung nach Fig. 1 sind die Laserdiode (1), das von dieser beleuchtete Interferometer (2), das Fabry-Perot-Interferometer (3) zur Wellenlängenstabilisierung, der Rechner (4) und die nur einmalig oder nach größeren Nutzungsintervallen benötigte Kalibriereinrichtung (5).

Die Laserdiode (1) ist mit einem Temperaturfühler (101) und einem Peltierelement (102) ausgestattet, mit denen eine Regelung (103) die Laserdiodentemperatur konstant hält. Den Betriebsstrom (i) liefert eine Stromversorgung (130).

Ein Teil des Lichtstrahls von der Laserdiode (1) zum Interferometer (2) wird durch Spiegel (303) ausgekoppelt und durch das Fabry-Perot-Interferometer (3) auf eine Fotodiode (301) bzw. auf die Referenzdiode (302) gerichtet. Die Ausgänge der Fotodioden (301) und (302) sind mit einem PI-Regler (305) verbunden, der auf die Stromversorgung (130) der Laserdiode (1) wirkt.

In bekannter Weise wird so die Stabilisierung der Wellenlänge (λ_L) im Luftraum (230) des Interferometers (2) erreicht, wozu eine Öffnung (320) im Gehäuse des Fabry-Perot-Interferometers (3) und dessen Anordnung im Luftraum (230) des Interferometers (2) sicherstellt, daß die Luft im Fabry-Perot-Interferometer (3) und im Interferometer (2) im thermodynamischen Gleichgewicht steht und gleichen Brechungsindex hat.

Damit ist aber die absolute Größe der Wellenlänge (λ_L) noch nicht bekannt und der Regelbereich für die Frequenz ist zu eng, um die gewöhnlichen Schwankungen des Brechungsindex im Luftvolumen (230) des Interferometers (2) bei Laborbedingungen kompensieren zu können.

Erfindungsgemäß werden daher im Luftvolumen (230) des Interferometers (2) Sensoren für den Luftdruck p (201), die Lufttemperatur T_L (202) und optional für die relative Luftfeuchtigkeit r_F (203) angeordnet. Wegen der thermischen Trägheit des Gehäuses kann ein weiterer Sensor für die Temperatur T_F (304) des Fabry-Perot-Interferometers (3) an diesem angebracht werden.

Die Meßwerte der Sensoren (201, 202, 203, 304) und die Größe des Laserdiodenstroms i der Stromversorgung (130) werden auf die Eingänge (401) des Rechners (4) geführt.

Nur zur ersten Inbetriebnahme und bei Bedarf zur Neukalibrierung nach längerer Betriebsdauer oder nach Änderungen des Aufbaus wird die Kalibriereinrichtung (5) mit der Laserlichtquelle verbunden.

Mit einem Teilerspiegel (501) wird ein Teil des Laserlichts auf einen Vakuumwellenlängendetektor (502) geleitet, der z. B. ein Wavemeter, das die Wellenlänge mit einer kalibrierten Referenz vergleicht, sein kann. In das Luftvolumen (230) des Interferometers (2) wird ein Detektor (204) für die Brechzahl n_L eingebracht, insbesondere ein Refraktometer.

Alternativ kann auch in ein zur Längenmessung ausgelegtes Interferometer (2) ein Längennormal eingebracht werden und aus dem Meßwert kann der Absolutwert der Luftwellenlänge λ_L bestimmt werden.

Weiter wird in bekannter Weise der freie Spektralbereich FSR des Fabry-Perot-Interferometers (3) bestimmt. Der Regelkreis (1, 3, 305, 130) zur Luftwellenlängestabilisierung wird eingebracht und die Startwerte i_0 des Laserdiodenstroms und $T_{LD,0}$ der Laserdiodentemperatur werden von der Kalibriereinrichtung (5) erfaßt, ebenso wie die Startwerte der Sensoren (201, 202, 203) im Luftvolumen (230) und des Temperatursensors (304) am Fabry-Perot-Interferometer (3), z. B. über die Eingänge (401).

Alle von der Kalibriereinrichtung (5) erfaßten Werte werden in einem Kalibrierspeicher (450) gespeichert. Die Meßwerte können aber auch zuerst im Rechner (4) ausgewertet werden und dann im Kalibrierspeicher (450) abgelegt werden.

Der Rechner (4) gibt beim Start der Anordnung Startwerte an die Temperaturstabilisierung (103) für die Temperatur T_{LD} der Laserdiode (1) und an die Stromversorgung (130) für den Strom i der Laserdiode (1).

Er (4) verknüpft außerdem in einem Modul (420) die Roh-Meßwerte m/λ_L des Interferometers (2) mit dem bestimmten Wert der Luftwellenlänge λ_L zu dem kalibrierten genauen Meßwert m , der in beliebiger üblicher Weise angegeben wird. Das Interferometer (2) kann insbesondere zur Längenmessung ausgelegt sein, so daß die Meßwerte (m) Längen sind.

Durch Alterung verändern sich verschiedene Parameter der Anordnung, insbesondere die Strom/Wellenlängen-Kennlinie $\lambda(i)$ der Laserdiode (1), so daß zu einer bestimmten Luftwellenlänge λ_L im Lauf der Zeit veränderte Regelparameter gehören. Dem entsprechend wird in zeitlichen Intervallen ein Korrekturwert λ_A gebildet und in dem Korrekturspeicher (410) abgelegt. Bei einem Neustart der Anordnung wird dieser Korrekturwert λ_A jeweils in die Bildung der Startwerte einbezogen.

Beispielsweise wird eine handelsübliche Laserdiode (1) bei einer Vakuumwellenlänge λ_v von ca. 785 nm mit einem Strom i der Größenordnung 60 mA betrieben.

Der freie Spektralbereich FSR des Fabry-Perot-Interferometers (3) ist ca. $10^{-5} \cdot \lambda_L$ (Luftwellenlänge). Die Stromdifferenz i_{FSR} , die zum Durchfahren eines freien Spektralbereiches FSR nötig ist, beträgt ca. 1 mA.

Als Regelparameter dient der Strom durch die Laserdiode (1). Bei der Inbetriebnahme der Laserdiode (1) wählt man einen Arbeitsbereich im Kennlinienfeld der Wellenlänge, der bei einer festen Temperatur liegt und einen Strombereich der Größe von etwas mehr als i_{FSR} umfaßt. Dieser Arbeitsbereich sollte möglichst weit von Modensprüngen entfernt sein.

Das Einlocken des Regelkreises (1, 3, 301, 305, 130) geschieht so, daß ein Lock innerhalb eines bestimmten vorgegebenen Strombereiches gesucht wird. Dieser Bereich muß mindestens etwas größer als i_{FSR} sein.

Zur Bestimmung der aktuellen Luftwellenlänge: Ist i der Strom, bei dem der Lock erfolgt, so ist die Vakuumwellenlänge der Laserdiode (1)

$$\lambda_v = \lambda_{v,0} + \frac{d\lambda_v}{di} (i - i_0) + \frac{d\lambda_v}{dT_L} (T_L - T_{L,0}) \quad (\text{Gl. 1})$$

und die Luftwellenlänge beträgt

$$\lambda_L = \lambda_v/n \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Koeffizienten $d\lambda_v/di$ und $d\lambda_v/dT_L$ (typische Werte: $6 \cdot 10^{-3}$ nm/A und 10^{-3} nm/K) wurden bei der Vermessung der Laserdiode (1) bzw. bei der Kalibrierung bestimmt. Der Brechungsindex n wird mit der Edlen-Formel näherungsweise berechnet, indem Meßwerte von T_L , p und evtl. rF eingesetzt werden. Die so berechnete Luftwellenlänge λ_L muß eine Transmissionswellenlänge des Fabry-Perot-Interferometers (3) sein. Diese Transmissionswellenlängen sind gegeben durch

$$\lambda_L = \lambda_{L,0} + \frac{d\lambda_L}{dp} (p - p_0) + \frac{d\lambda_L}{dT_F} (T_F - T_{F,0}) + N \cdot \text{FSR} \quad (\text{Gl. 3})$$

Der Koeffizient $d\lambda_L/dp$ beschreibt die Kompression des Fabry-Perot-Interferometers (3) auf Grund des Luftdrucks und kann aus dem E-Modul berechnet werden (Größenordnung: $d\lambda_L/dp = 10^{-9}$ nm/hPa); $d\lambda_L/dT_F$ berücksichtigt die Wärmeausdehnung des Fabry-Perot-Interferometers (3) (Größenordnung für diesen Wert: $2,5 \cdot 10^{-7}$ nm/K und kleiner nach Spezifikation von Zerodur. N muß eine ganze Zahl sein. Sie wird aus Gleichsetzen von Gleichung (Gl. 2) und (Gl. 3) und durch gewöhnliche Rundung gewonnen. Im Idealfall ist die Rundung nicht nötig; in der Praxis fließen jedoch vor allem die Alterung der Laserdiode (1) und Meßgenauigkeiten beim Brechungsindex der Luft ein. Für die endgültige Angabe des Wertes der Luftwellenlänge wird die Gleichung (3) mit dem richtigen ganzzahligen N herangezogen.

Zur Abschätzung der nötigen Meßgenauigkeit der einzelnen Parameter: Die Größenordnungen der Brechkoeffizienten sind

$$\begin{aligned} dn/dT_L &= -10^{-6}/K; \\ dn/dp &= 3 \cdot 10^{-7}/hPa; \\ dn/drF &= -10^{-8}/\%rF. \end{aligned}$$

Weiterhin ist zu beachten, daß die Brechzahl durch Fremdgase unter schlechten Bedingungen, z. B. in Fertigungsräumen, um größenordnungsmäßig $1 - 2 \cdot 10^{-6}$ erhöht werden kann. Da der Abstand der Transmissionsmaxima des Fabry-Perot-Interferometers (3) einer Brechzahldifferenz von 10^{-5} entspricht, werden somit keine hochpräzisen Temperatur- (202, 304) und Drucksensoren (201) benötigt. Auf die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit rF (203) kann in aller Regel sogar ganz verzichtet werden.

Damit werden typischerweise folgende Umweltsensoren benötigt:

- Druckmesser (201) mit einer Genauigkeit von ca. 1hPa;
- Luft-Thermometer (202) mit einer Genauigkeit von etwas weniger als einem Grad;
- Material-Thermometer (304) mit einer Genauigkeit, die von der thermischen Ausdehnung des Fabry-Perot-Interferometers abhängt und bei Konstruktion aus Zerodur bei etwa einem Grad liegen sollte.

Solche Sensoren (201, 202, 304) sind handelsüblich, preiswert und zuverlässig. Die Einsparung gegenüber der Anordnung eines kompletten zweiten Fabry-Perot-Interferometers, wie im oben genannten Stand der Technik, ist also beträchtlich.

Wandert im Laufe der Zeit der Strom durch die Laserdiode (1) aus dem vorgegebenen Regelbereich heraus (z. B. durch Veränderung des Brechungsindex der Luft), so kann er durch Änderung um ganzzahlige Vielfache von iFSR und neues Einlocken wieder in diesen hinein gebracht werden. In einem solchen Fall kann N entweder vollkommen neu bestimmt werden oder die Änderung von N aus der vorgenommenen Stromänderung ermittelt werden.

Zur Berücksichtigung der Alterung der Laserdiode (1): Sie äußert sich in einem Offset λ_A der Vakuumwellenlänge, so daß aus Gl. (1) wird:

$$\lambda_{v,A} = \lambda_{v,0} + \frac{d\lambda_v}{di} (i - i_0) + \frac{d\lambda_v}{dT_L} (T_L - T_{L,0}) + \lambda_A = \lambda_v + \lambda_A \quad (\text{Gl. 4})$$

Aus der laufenden Stabilisierung heraus kann $\lambda_{v,A}$ mit (Gl. 3) und (Gl. 2) bestimmt werden; λ_v enthält man aus (Gl. 1). Somit kann z. B. vor dem Abschalten λ_A bestimmt, im Korrekturspeicher (410) abgelegt und dieser Wert beim nächsten Einschalten verwendet werden. Bei der Bestimmung von N und λ_L wird dann (Gl. 4) anstelle von (Gl. 1) verwendet.

In dem beschriebenen Beispiel wird als Laser (1) eine Laserdiode (1) verwendet. Eine weitere vorteilhafte Alternative ist die Verwendung eines Nd-YAG-Ringlasers. Diese Bauart ist durch Veränderung der Temperatursteuerspannung rund um $\lambda = 1064 \text{ nm}$ verstimmbar. Der Regelbereich ist durch Modensprünge begrenzt und etwa dreimal so groß wie der freie Spektralbereich des oben genannten Fabry-Perot-Interferometers (3).

Für den Regelkreis geeignete Fabry-Perot-Interferometer (3) sind im oben genannten Stand der Technik beschrieben. Vorteilhaft ist ein konfokaler Aufbau mit Zerodur-Glaskeramik-Tragkörper und ausreichend großer Bohrung für freien Luftaustausch.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung und Fixierung der Luftwellenlänge (λ_L) einer Lichtquelle (1) mit einem Stabilisierungs-Regelkreis (1, 3, 301, 305, 130), der eine Mehrdeutigkeit mit bestimmten Sprüngen (FSR) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Beseitigung der Mehrdeutigkeit ein Grobwert der Luftwellenlänge aus thermodynamischen Parametern (T_L , p, rF) der Umgebungsluft (230) und bedarfsweise von Teilen (3) des Regelkreises (1, 3, 301, 305, 130) bestimmt wird, aus diesem Grobwert durch Rundung eine Zahl (N) von Sprüngen (FSR) bestimmt wird und mit dieser Zahl (N) von Sprüngen (FSR) die exakte Luftwellenlänge (λ_L) festgelegt wird.

2. Fabry-Perot-stabilisierte Laserlichtquelle für Interferometer (2) mit:

- Laser (1) mit mittels mindestens eines Regelparameters (i) über einen Frequenzbereich durchstimmbarer Frequenz
- Fabry-Perot-Interferometer (3) mit Luftfüllung (320) im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem Volumen (230) des Interferometers (2) und mit einem freien Spektralbereich (FSR) der kleiner als der Regelbereich des Lasers (1) ist und mit einem Fotodetektor (301) an seinem Ausgang
- Regelkreis, der mittels des Fotodetektors (301) und der Regelparameter (i) des Lasers (1) die Luftwellenlänge (λ_L) des Lasers (1) auf eine Stelle eines Transmissionsmaximums (N) des Fabry-Perot-Interferometers (3) fixiert und bei Erreichen der Grenzen des Frequenzbereiches einen Sprung über den freien Spektralbereich (FSR) des Fabry-Perot-Interferometers (3) zu einem benachbarten Transmissionsmaximum ($N+1$, $N-1$) ausführt
- Geber und Speicher (450) für Luftdruck (201) und Temperatur (202) im Volumen (230) des Interferometers (2), für den oder die Regelparameter (i) und für die Summe der Sprünge zwischen Transmissionsmaxima (N)
- Rechner (4) zur
 - Berechnung eines Näherungswertes der Luftwellenlänge (λ_L) aus der Vakuumwellenlänge (λ_v),

- bestimmt durch die Regelparameter (i), und aus dem Brechungsindex, bestimmt nach der Edlen-Parametermethode aus den Werten von Luftdruck (p) und -temperatur (T_L),
- Bestimmung der Ordnung des dem Näherungswert nächstliegenden Transmissionsmaximums (N),
 - Bestimmung der genauen Luftwellenlänge (λ_L) aus der Ordnung des nächstliegenden Transmissionsmaximums (N) und dem bekannten Modenabstand des Fabry-Perot-Interferometers (3).
3. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Laser (1) eine Laserdioden eingesetzt ist mit den Regelparametern Diodenstrom (i) und Diodentemperatur (T_L).
4. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Laser (1) ein Nd-YAG-Ringlaser eingesetzt ist mit dem Regelparameter Temperatursteuerspannung.
5. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Fabry-Perot-Interferometer (3) konfokal aufgebaut ist.
6. Laserlichtquelle nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Diodentemperatur (101) festgehalten wird und der Regelkreis (1, 3, 301, 305, 130) den Diodenstrom (i) als Regelparameter nutzt.
7. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich Geber und Speicher für die Körpertemperatur (304, T_F) des Fabry-Perot-Interferometers (3) und/oder für die Temperatur (101, T_{LD}) des Lasers (1) und/oder für die Luftfeuchtigkeit (203, rF) im Volumen (230) des Interferometers (2) vorgesehen sind und im Rechner (4) zur Berechnung des Näherungswerts der Luftwellenlänge (λ_L) herangezogen werden.
8. Verfahren zur Kalibrierung einer Laserlichtquelle nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß im stabilisierten Betrieb zusätzlich gemessen werden
- zwei der Größen Frequenz des Lasers (1), Luftwellenlänge (λ_L) der Laserlichtquelle, Brechungsindex (n_L) der Luft im Interferometervolumen (230)
 - der freie Spektralbereich (FSR) des Fabry-Perot-Interferometers (3)
 - damit im Rechner (4) eine Funktion bestimmt und gespeichert wird zur Berechnung der Luftwellenlänge (λ_L).
9. Verfahren zum Einschalten nach vorherigem Ausschalten einer Laserlichtquelle nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß ein zum Ausschaltzeitpunkt gespeicherter Wert (λ_a) für die alterungsbedingte Verschiebung der Frequenz des Lasers (1) bei gleichen Regelparametern (i) in die Berechnung des Näherungswerts der Luftwellenlänge (λ_L) einbezogen wird.
10. Verfahren zur Kalibrierung einer Laserlichtquelle nach Anspruch 8 für ein Längenmeßinterferometer (2), dadurch gekennzeichnet, daß die Luftwellenlänge (λ_L) mittels eines Längennormal im Längenmeßinterferometer (2) bestimmt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Brechungsindex der Luft nach der Edlen-Formel aus Luftdruck (p), Temperatur (T_L) und Luftfeuchtigkeit (rF) im Interferometervolumen (230) bestimmt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Brechungsindex der Luft mit einem Refraktometer gemessen wird.
13. Verfahren zum Betrieb einer Fabry-Perot-stabilisierten Lichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der genauen Luftwellenlänge (λ_L) im Rechner (4) in festen zeitlichen Intervallen wiederholt wird.
14. Verfahren zum Betrieb einer Fabry-Perot-stabilisierten Lichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der genauen Luftwellenlänge (λ_L) im Rechner (4) bei vorbestimmten Änderungen der Signale der Geber (201 – 204, i, 304) wiederholt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

